LANIERE EXPERIMENTALE

2ème année ----- 1er cycle

JP. BROSSARD

DYNAMIQUE DU VEHICULE

CAHIER 2

Interaction véhicule - sol

Voir aussi cahier 1.3 Mécanique : JP. BROSSARD

Voir aussi cahier 4 Construction : G. PANEL

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés

INTERACTION SOL-VEHICULE

I - ANALYSE DU COMPORTEMENT D'UNE ROUE ISOLEE AVANCANT A VITESSE UNIFORME

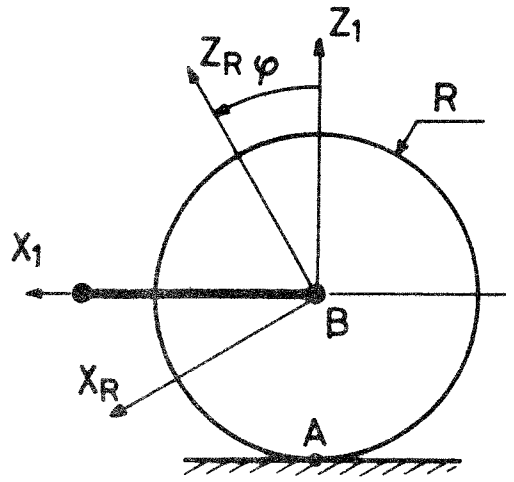
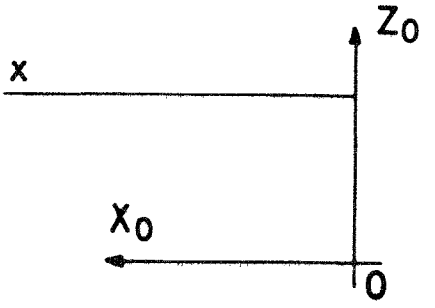
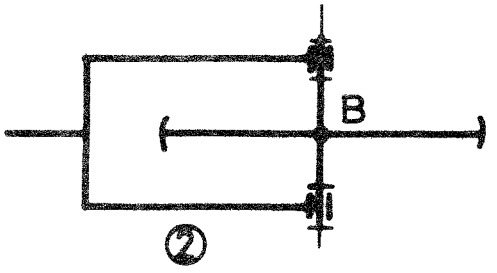


Schéma d'expérience

B, $\overrightarrow{X_1}$, $\overrightarrow{Y_1}$, $\overrightarrow{Z_1}$ repère en translation par rapport à (O, $\overrightarrow{X_o}$, $\overrightarrow{Y_o}$, $\overrightarrow{Z_o}$) lié au sol.





Les actions appliquées à la roue peuvent être représentées par le torseur T_D (torseur des forces "données")

$$\overrightarrow{F_D} = [X_D, Y_D, Z_D]_1$$

$$\overrightarrow{M_D}\ (B) = [L_D, M_D, N_D]_1$$

Les actions de contact sol-roue peuvent être représentées par le torseur.

$$\overrightarrow{F_{OR}} = [X_{OR}, Y_{OR}, Z_{OR}]_1$$

$$\overrightarrow{M_{OR}}(A) = [L_{OR}, M_{OR}, N_{OR}]_1$$

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés

Sur la roue agissent également les actions de pesanteur représentées par le vecteur

$$\vec{P} = - Mg \vec{Z_1} \qquad \text{en B}$$

En outre on supposera que la liaison de la roue $/(S_2)$ est parfaite.

Lorsque la roue roule sans glisser sur le sol $(\vec{V}_R{}^\circ(A) = 0)$ on a :

$$\begin{cases} x' - a\,\phi' = 0 \\ |X_{OR}| < f\,|Z_{OR}| \end{cases}$$

$$\begin{cases} |M_{OR}| = h\,|Z_{OR}| \\ M_{OR} \text{ de signe opposé à } \phi' \end{cases}$$

h est le paramètre de résistance au roulement x h est de l'ordre de 10^{-3}m. En fait on n'utilise pas le paramètre de résistance au roulement mais une autre formulation.

II - COEFFICIENT DE FROTTEMENT DE ROULEMENT

Dans tout ce qui suit on supposera $x' > 0 \qquad x' = cte$

Appliquons les théorèmes généraux à la roue seule

$$X_D + X_{OR} = 0$$
$$Z_D + Z_{OR} - mg = 0$$
$$M_D + (\vec{B}_A \wedge \vec{F}_{OR})\,\vec{Y}_1 + M_{OR} = 0$$

Les lois de COULOMB donnent :

$$M_{OR} = - h\,Z_{OR} \qquad (Z_{OR} > 0 \qquad \phi' > 0)$$

Le théorème du moment s'écrit donc :

$$M_D - R\,X_{OR} - h\,Z_{OR} = 0$$

$$X_{OR} = \frac{M_D}{R} - \frac{h}{R}\,Z_{OR}$$

Pour une roue soumise a aucun couple $M_D = 0$

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$X_{OR} = - \frac{h}{R} Z_{OR}$$

$$X_D = \frac{h}{R} Z_{OR}$$

X_D est la force de traction nécessaire pour faire avancer la roue. Sa connaissance permet donc de connaître la résistance au roulement.

REMARQUE : La formule $X_{OR} = - \frac{h}{R} Z_{OR}$ est tout à fait analogue à la formule de COULOMB s'il y avait glissement

$$X_{OR} = - f \cdot Z_{OR}$$

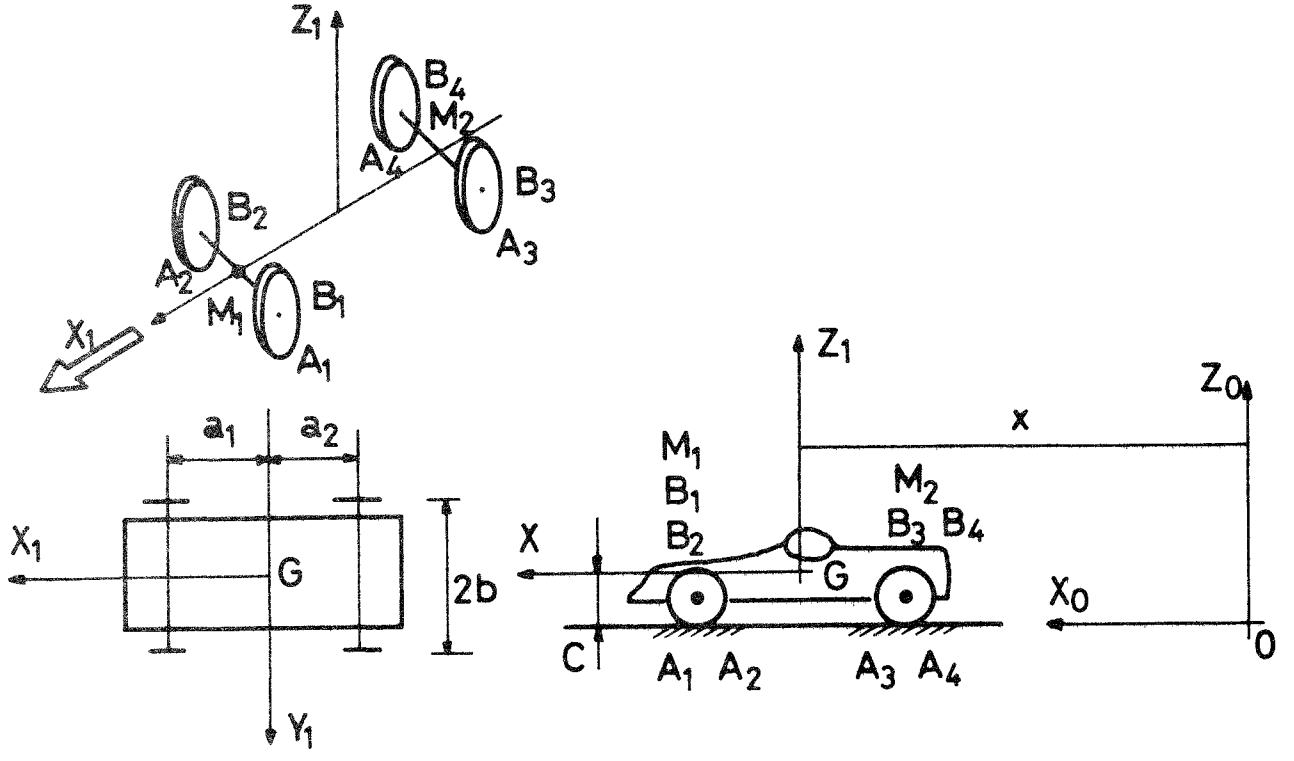
$\frac{h}{R}$ est sans dimension. On posera :

$$\frac{h}{R} = \mu$$

μ est appelé coefficient de frottement de roulement et c'est lui que l'on utilise pour caractériser la résistance au roulement.

μ est de l'ordre de $\frac{10^{-3}}{0,5} \simeq 2,10^{-2}$ mais nous étudierons plus en détail sa variation notamment en fonction de la vitesse et de la pression.

III - RESULTATS GLOBAUX SUR LE VEHICULE



© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés

A l'avant par raison de symétrie

$$\begin{cases} X_{01} = X_{02} = -\frac{h}{R} Z_{01} & M_{01} = -h\, Z_{01} \\ Z_{01} = Z_{02} & M_{02} = -h\, Z_{02} \end{cases}$$

A l'arrière

$$\begin{cases} X_{03} = X_{04} = -\frac{h}{R} Z_{03} & M_{03} = -h\, Z_{03} \\ Z_{03} = Z_{04} & M_{04} = -h\, Z_{04} \end{cases}$$

Supposons le véhicule avançant en ligne droite à vitesse constante, remorqué par un autre véhicule. Le véhicule tracteur exerce des actions représentées par le torseur

$$\vec{F}_D = [X,\ 0,\ 0]_1 \qquad \vec{M}_D(G) = [0,\ 0,\ 0]$$

Les théorèmes généraux appliqués au véhicule donnent

$$X + 2 X_{01} + 2 X_{03} - \frac{\rho}{2} C_x SV^2 = 0 \qquad (1)$$

$$2 Z_{01} + 2 Z_{03} - \frac{\rho}{2} C_z SV^2 - M_g = 0 \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{4} (\overrightarrow{GA}_i \wedge \vec{F}_{oi})\vec{Y}_1 + \sum_{i=1}^{4} M_{oi} + \frac{\rho}{2} C_M\, l\, SV^2 = 0 \qquad (3)$$

$$\vec{GA}_i \wedge \vec{F}_{oi} = \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \\ -c \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} X_{oi} \\ 0 \\ Z_{oi} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} b_i\, Z_{oi} \\ -a_i\, Z_{oi} - c\, X_{oi} \\ -b\, X_{oi} \end{pmatrix}$$

L'équation 3 s'écrit donc compte tenu de (1) et des lois de Coulomb

$$-2 a_1 Z_{o1} + 2 a_2 Z_{o3} - C\left(\frac{\rho}{2} Cx\, SV^2 - X\right) - 2h\, Z_{o1} - 2h\, Z_{o3}$$

$$+ \frac{\rho}{\alpha} C_M\, l\, SV^2 = 0$$

Or $h \ll a_1$ et $h \ll a_2$

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés

Pour déterminer Z_{o1} et Z_{o3} nous avons donc le système d'équations.

$$\begin{cases} Z_{o1} + Z_{o3} = \frac{Mg}{2} + \frac{1}{2}\frac{\rho}{2} C_z \, SV^2 \\ - a_1 Z_{a1} + a_2 Z_{o3} = \frac{C}{2}\left(\frac{\rho}{2} C_x \, SV^2 - X\right) - \frac{1}{2}\frac{\rho}{2} C_M \, 1 \, SV^2 \end{cases}$$

$$Z_{o1} = \frac{1}{a_1 + a_2} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\left(Mg + \frac{\rho}{2} C_z \, SV^2\right) & 1 \\ \frac{C}{2}\left(\frac{\rho}{2} Cx \, SV^2 - X\right) - \frac{1}{2}\frac{\rho}{2} C_m \, 1 \, SV^2 & a_2 \end{bmatrix}$$

$$Z_{o1} = \frac{1}{2}\frac{a_2}{a_1 + a_2}\left(Mg + \frac{\rho}{2} C_z \, SV^2\right) - \frac{1}{2}\frac{C}{a_1 + a_2}\left(\frac{\rho}{2} Cx \, SV^2 - X\right) + \frac{1}{2}\frac{\rho}{2} C_M \, SV^2$$

$$Z_{o3} = \frac{1}{a_1 + a_2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2}\left(Mg + \frac{\rho}{2} C_z \, SV^2\right) \\ a_1 & \frac{C}{2}\left(\frac{\rho}{2} C_x \, SV^2 - X\right) - \frac{1}{2}\frac{\rho}{2} C_m \, 1 \, SV^2 \end{bmatrix}$$

$$Zo_3 = \frac{1}{2}\frac{a_1}{a_1 + a_2}\left(Mg + \frac{\rho}{2} C_z \, SV^2\right) + \frac{C}{2}\left(\frac{\rho}{2} C_x \, SV^2 - X\right) - \frac{1}{2}\frac{\rho}{2} C_M \, SV^2$$

En pratique pour tous les véhicules de série on pourra prendre :

$$Z_{o1} = \frac{1}{2}\frac{a_2}{a_1 + a_2} Mg \qquad Z_{o3} = \frac{1}{2}\frac{a_1}{a_1 + a_2} Mg$$

Ce résultat est loin d'être vrai pour les véhicules de compétition ou le terme $\frac{\rho}{2} Cz \, SV^2$ est intentionnellement rendu important.

Appliquons à chacune des roues le théorème du moment dynamique

$$\begin{cases} M_{01} - R X_{01} = 0 \\ M_{02} - R X_{02} = 0 \\ M_{03} - R X_{03} = 0 \\ M_{04} - R X_{04} = 0 \end{cases}$$

En tenant compte des lois de Coulomb :

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés

$$X_{01} = - \frac{h}{R} Z_{01}$$

$$X_{02} = - \frac{h}{R} Z_{02}$$

$$X_{03} = - \frac{h}{R} Z_{03}$$

$$X_{04} = - \frac{h}{R} Z_{04}$$

La résistance totale est donc

$$X_{01} + X_{02} + X_{03} + X_{04} = - \frac{h}{R} (Z_{01} + Z_{02} + Z_{03} + Z_{04})$$

$$= - \frac{h}{R} Mg$$

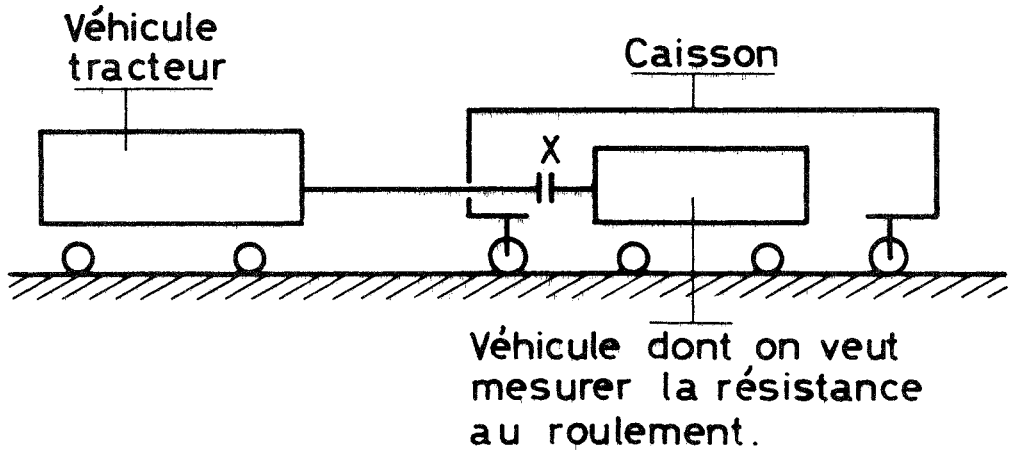
$$X_{01} + X_{02} + X_{03} + X_{04} = - \mu - Mg$$

μ est le coefficient de résistance de roulement.

On peut mesurer la résistance totale en connaissant X

$$X_{01} + X_{02} + X_{03} + X_{04} + - X + \frac{\rho}{2} Cx \; SV^2$$

On peut procéder de la manière suivante :



Le véhicule à essayer est soustrait aux actions aérodynamiques en le plaçant dans un caisson qui est lui-même tracté par un autre véhicule.

Ainsi on a :

$$X_{01} + X_{02} + X_{03} + X_{04} = - X$$

X est déterminé à l'aide d'un dynamomètre.

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés

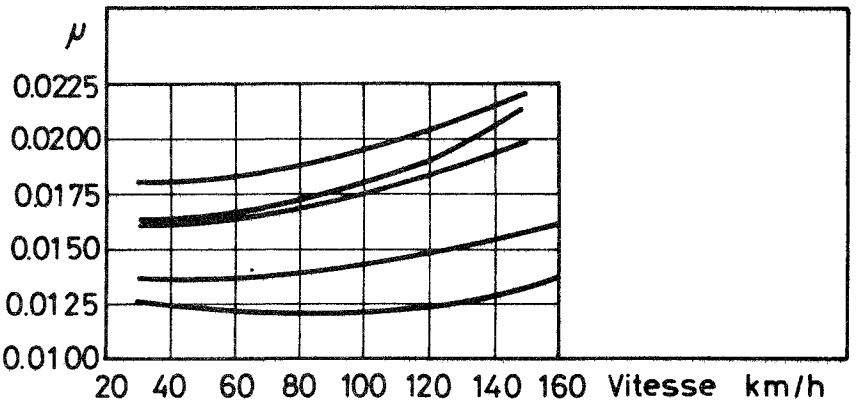
IV - RESULTATS EXPERIMENTAUX

A - Variation de μ

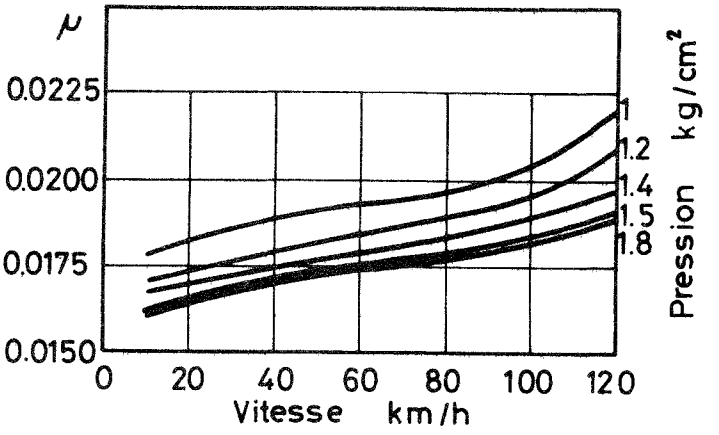
Le coefficient de résistance au roulement μ est de la forme

$$\mu = a + bV^2$$

Il varie avec la vitesse et avec la pression de gonflage des pneumatiques.



Variation de μ en fonction de la vitesse



Variation de μ en fonction de la pression

B - Exemple de valeur de $R_R = |X_{01} + X_{02} + X_{03} + X_{04}|$

Véhicule : masse 1160 Kg R = 0,309

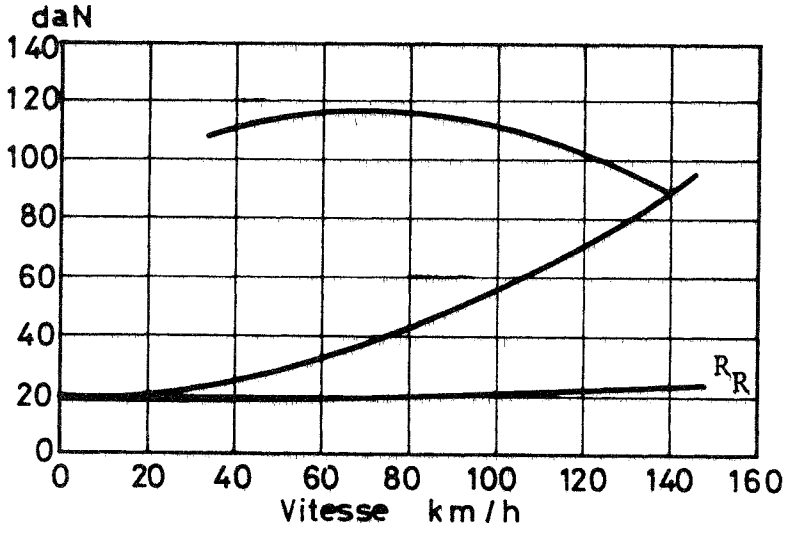
μ et R_R sont donnés dans le tableau suivant :

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés

V Km/h	V m/s	μ	R_R (daN)
0	0	0,0162	18,8
10	2,78	0,0162	18,8
20	5,56	0,0162	18,8
30	8,35	0,0163	18,9
40	11,11	0,0164	19
60	16,67	0,0166	19,3
80	22,2	0,0172	20
100	27,78	0,018	20,9
120	33,33	0,019	22
140	38,9	0,0205	23,3

C - Comparaison de la résistance au roulement et de la résistance aérodynamique.

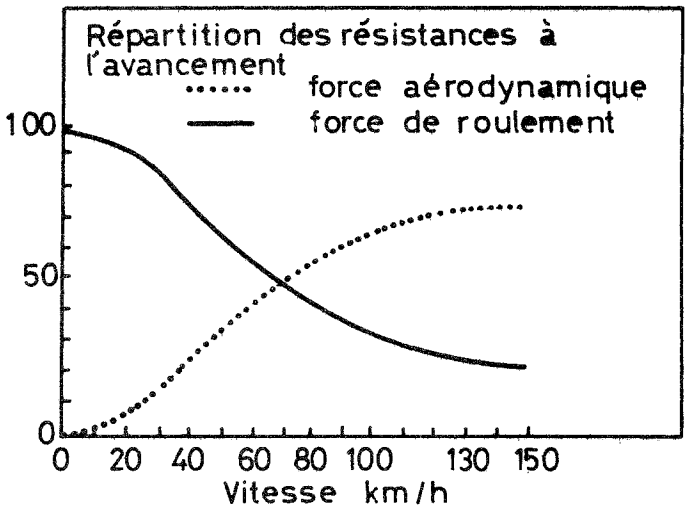
A basse vitesse la résistance au roulement est prépondérante. A grande vitesse c'est la résistance aérodynamique. Le résultat suivant représente bien la situation générale.



$R_R + R_A$

Résistance au roulement et résistance aérodynamique
Véhicule V.W.1600
Masse 1160 Kg S = 1,83 m2 C_x = 0,38

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés



Comparaison de la résistance au roulement et de la résistance aérodynamique.

V - PUISSANCE DEVELOPPEE PAR LES ACTIONS DE CONTACT SOL/ROUE

La puissance totale développée est :

$$\mathscr{P}^{\circ}_{R} = \sum_{i=1}^{4} \left(\vec{M}_{oi} \cdot \vec{\Omega}_i^{\circ} + \vec{F}_{oi}\, \vec{V}_i\,(A_i) \right) \qquad \vec{V}_i\,(A_i) = 0 \qquad V_i$$

$$\mathscr{P}^{\circ}_{R} = M_{01}\,\phi' + M_{02}\,\phi' + M_{03}\,\phi' + M_{04}\,\phi'$$

$$x' - R\,\phi' = 0 \qquad x' = V$$

$$\mathscr{P}^{\circ}_{R} = (M_{01} + M_{02} + M_{03} + M_{04})\,\frac{V}{R}$$

$$\mathscr{P}^{\circ}_{R} = -\,h\,(Z_{01} + Z_{02} + Z_{03} + Z_{04})\,\frac{V}{R}$$

$$\mathscr{P}^{\circ}_{R} = -\,\frac{h}{R}\,Mg\,V$$

$$\mathscr{P}^{\circ}_{R} = -\,\mu\,Mg\,V$$

$$\mathscr{P}^{\circ}_{R} = -\,Mg\,(aV + bV^3)$$

On voit qu'elle varie comme le cube de la vitesse.

© [JP. Brossard],[1980], INSA de Lyon, tous droits réservés